

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БУКСИРУЕМЫХ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ЗОНДИРУЮЩИХ СИСТЕМ

А. Н. Греков, Н. А. Греков

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт природно-технических систем»,
Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Гоголя, 14,
e-mail: i@angrekov.ru*

Статья посвящена анализу современных буксируемых зондирующих систем, используемых для измерения характеристик морской воды *in situ* в процессе движения судна. Рассмотрены ключевые методы, включая интегральные измерители, гилянды гидрозондов, системы с автоматическим управлением глубиной и циклическим зондированием. Особое внимание уделено преимуществам буксируемых систем перед автономными устройствами (дрифтеры, глайдеры) и стационарными сетями: высокая мобильность, оперативная передача данных, гибкая адаптация траектории и глубины измерений. На основе экспериментальных данных и авторских разработок проведен сравнительный анализ 8 методов, выделены их технические характеристики, ограничения и области применения. Например, метод циклического изменения глубины (до 1000 м на скорости 15 узлов) обеспечивает высокое разрешение при изучении микроструктурных процессов, а гибридные системы (например, МГИ 4201) совмещают измерения CTD, гидрохимии и турбулентности, сокращая время экспедиций. Результаты представлены в табличной форме, включая оценку методов по критериям: пространственно-временное разрешение, скорость буксировки, комплексность измерений. Практические рекомендации подчеркивают целесообразность комбинирования методов для решения конкретных задач (микроструктурные, мезомасштабные, крупномасштабные исследования). Ключевым выводом является формирование новой парадигмы экспедиционных исследований, основанной на синхронном мультипараметрическом мониторинге в реальном времени. Это позволяет перейти от локальных замеров к динамическому управлению процессом зондирования, что значительно повышает эффективность изучения океанических процессов и оптимизирует ресурсные затраты.

Ключевые слова: методы, буксируемые системы, модели, контактные измерения, погружение, анализ

Введение

В условиях стремительного прогресса науки и техники, характерного для современных исследований в области океанографии, становится очевидным, что необходимо существенно расширить и углубить экспериментальные методы. Их роль и значимость в изучении океана постоянно возрастают. Наряду с традиционными подходами и инструментами натурного гидрофизического эксперимента при контактных измерениях характеристик морской воды, все чаще применяются специализированные

методы, разработанные для решения конкретных исследовательских задач. Эти методы открывают новые перспективы в познании океана.

Для эффективного выполнения экспериментальных задач, направленных на исследование изменчивости океана, широко используются буксируемые измерительные системы. Эти системы помогают оптимизировать процесс перемещения судна в исследуемых районах и во время съемок на полигонах. В зависимости от специфики задач, для решения которых они предназначены, были разработаны различные типы буксируемых измерительных систем.

Ключевым преимуществом буксируемых измерительных систем перед автономными устройствами (например, дрейфтерами, глайдерами) и стационарными распределенными сетями является их способность совмещать высокую мобильность с непрерывным контролем параметров в режиме реального времени. В отличие от автономных зондов, требующих последующего извлечения данных и подверженных риску потерь, буксируемые системы обеспечивают оперативную передачу информации на борт судна, минимизируя задержки в анализе. Кроме того, они позволяют гибко адаптировать траекторию и глубину зондирования в процессе движения, что критически важно при исследовании динамических процессов (например, фронтальных зон или вихревых структур). В сравнении с распределенными сетями, требующими масштабного развертывания и обслуживания, буксируемые комплексы демонстрируют экономическую эффективность при работе на обширных акваториях, особенно в условиях ограниченных временных и ресурсных возможностей экспедиций.

Развитие новых технологий съемок предоставляет исследователям не только возможность планирования эксперимента, но и позволяет осуществлять управление им в процессе исследования, обеспечивая полное понимание сути явлений. Применение новой технологии в океанографических исследованиях может привести к значительному экономическому эффекту за счет сокращения времени, затрачиваемого на фоновые съемки при поисковых работах. Экономический эффект достигается за счет принципиального сокращения этапа предварительного мониторинга. Если классические методы (например, стационарные станции или автономные глайдеры) требуют многодневного сбора данных для построения базовой модели акватории, то буксируемые системы с высокочастотным зондированием (до 1 Гц) формируют трехмерные карты параметров за часы. Кроме того, гибридные системы, такие как МГИ 4201, совмещают измерения STD, гидрохимии и микротурбулентности, заменяя несколько специализированных приборов, что снижает логистические затраты.

В статье не представлены известные модели буксировки и зондирования, описывающие положение в воде буксируемого троса с грузом на конце или без него, а лишь приведены ссылки на них. Для исследования процесса погружения системы «трос–гидрозонд» с движущегося судна, который заключается в буксировке гидрозонда за судном в поверхностном слое океана с периодическим заглублением его на предельную глубину, авторами были разработаны модели, подробное описание которых представлено в работах (Греков, Салтанов, 2001; Салтанов и др., 2002; Греков и др., 2004).

Основная часть

В настоящее время существует множество систем, предназначенных для измерения параметров водной среды как на небольших, так и на крейсерских скоростях судна. Мы рассмотрим как уже существующие методы измерений, так и авторские разработки, чтобы определить, в каких условиях они могут быть наиболее результативными. Порядок рассмотрения методов и систем будет формироваться в зависимости от объема и значимости, по мнению авторов, исходной информации.

Необходимо подчеркнуть, что в некоторых случаях было затруднительно определить критерий, на основании которого можно было бы провести четкое разграничение между различными методами и системами. Это обусловлено тем, что для различных систем могут быть применимы одни и те же методы.

Метод 1. Измерения с интегральными измерителями и восстановлением профиля

Метод основан на измерении средних характеристик слоя морской воды и их мгновенных значений на верхней и нижней границах этого слоя в процессе буксировки измерительной системы. Средние значения определяются с помощью распределенных первичных преобразователей, а мгновенные – с помощью точечных датчиков.

Профили элементов морской воды восстанавливаются по результатам всех измерений с использованием наиболее подходящих теоретических моделей вертикальных распределений. Измерительные комплексы, построенные на этом принципе, отличаются простотой и надежностью в работе. Они позволяют исследовать большие пространственные неоднородности элементов морской среды.

Измерения с помощью точечных и распределенных датчиков могут проводиться с любой желаемой частотой. Однако по результатам этих измерений невозможно получить тонкую вертикальную структуру поля. Из-за этого метод имеет ограничения на исследование малых пространственных неоднородностей.

Возможности для комплексных измерений также ограничены. Если точечные датчики позволяют измерять большинство элементов водной среды, то распределенные преобразователи могут контролировать только два параметра: среднюю температуру и средневзвешенную скорость звука в слое воды. К числу таких измерителей относятся термохалинный буксируемый измерительный комплекс МГИ 4205 с распределенными датчиками температуры и обратные эхолоты (Греков, 1985; Иванов и др., 1980; Греков, 1982; Иванов и др., 1980).

Метод 2. Измерения с гидрофонами свободного падения и всплытия многократного действия

В системе используются автономные зонды, которые свободно падают, чтобы исследовать микроструктуру на любой глубине океана. Система включает в себя

зонды с программируемыми устройствами для регистрации данных и для контроля плавучести. Зонды расположены в корпусе, который разделен на секции и имеет обтекаемую форму. Также в корпусе есть элементы плавучести, сбрасываемый балласт и хвостовой стабилизатор, который обеспечивает свободное падение зонда с постоянной вертикальной ориентацией и стабильной скоростью, когда есть балласт. Когда команда на сброс балласта поступает, устройство управления останавливает свободное падение зонда. В результате плавучесть зонда меняется и он всплывает на поверхность. Затем зонд обнаруживается и поднимается на борт судна (Пака и др., 1984; Пака и др., 2012; Paка et al., 1999).

Ограничений на исследование малых пространственных масштабов нет, так как гидрозонды можно выбрасывать за борт через короткие промежутки времени. Однако в целом на выполнение разреза требуется много времени. После того, как судно выпустило партию гидрозондов, оно возвращается в точки измерения, чтобы найти и выловить всплывшие на поверхность гидрозонды. В лучшем случае на проведение разреза уходит в три раза больше времени, чем на прохождение его полным ходом. По опубликованным данным, потери гидрозондов могут достигать 50 % от их общего количества. Системы такого типа предназначены для комплексных измерений, но из-за своей сложности и дороговизны они использовались только в некоторых районах и в течение ограниченного периода времени.

Примером таких измерителей является система Топаз (МГИ 4105), Топаз М, зонд VMP 6000 Deep Sea Turbulence Profiler (<https://rocklandscientific.com/wp-content/uploads/2025/04/VMP-6000.pdf>; Колесников и др., 1963; Черниченко, 1982).

Однако система, основанная на использовании автономных свободнопадающих и всплывающих зондов, имеет ряд недостатков. Для зондов необходима дополнительная система дистанционного обнаружения на водной поверхности. Поиск зондов сопряжен с увеличением временных и финансовых затрат на исследования. В случае неблагоприятных погодных условий существует вероятность их утраты. Этот метод не подходит для исследования больших пространственных неоднородностей. Также он не пригоден для проведения попутных измерений.

Метод 3. Измерения с применением буксировки гирлянды гидрозондов

Метод основан на буксировке однотипных точечных измерителей, расположенных на заданных горизонтах, с последующим восстановлением вертикального распределения элементов на основе полученных данных.

Этот принцип используется в системе, состоящей из последовательности зондов, закрепленных на буксируемом кабеле или тросе через определенные промежутки. Датчики или многоканальные измерители передают информацию на бортовое устройство с помощью гальванической связи по многожильному кабелю или индуктивной связи с одножильным кабелем. Метод характеризуется значительной дискретностью измерений вертикального профиля и отличается сложностью в реализации, что, в свою очередь, ограничивает возможности исследования гидрофизических

процессов малых пространственных масштабов, например, инверсии температуры с большой горизонтальной протяженностью могут остаться незамеченными. Скорость буксировки гирлянды зондов не превышает 6–8 узлов. К таким измерителям относятся термисторные цепи. Существует, например, термическая система Ричардсона и Хаббарда. Датчики температуры в виде 23 термисторов, размещенных через каждые 7.5 м, с постоянной времени 20 с и чувствительностью 0.01 °C, позволяют измерять температуру воды в диапазоне –2...+32 °C; они смонтированы на кабеле в резиновом шланге. В конце схемы расположен датчик давления, гидродинамический заглубитель массой 800–1500 кг и термисторные цепи (Лямин и др., 1965).

Метод 4. Измерения гидрозондом, оснащенным подвижным крылом

Буксируемая система для океанографических съемок представляет собой устройство с подвижным крылом, оснащенное буксирным тросом, который удерживается в натянутом состоянии благодаря специальному грузу. На обоих концах троса расположены амортизаторы и пусковые устройства, предназначенные для остановки зонда и изменения угла наклона подводного крыла с целью корректировки направления его движения вдоль кабеля.

Работа буксируемой системы осуществляется на пониженных скоростях судна, что ограничивает ее применение в попутных измерениях. Для выполнения каждого разреза требуется значительное время. Кроме того, данный метод не позволяет проводить измерения в малых масштабах, поскольку зонд должен вернуться на поверхность для начала нового цикла.

Траектория движения гидрозонда в толще воды имеет, как правило, пилообразный вид. Для получения профиля океанических элементов необходимо усреднить данные измерений, полученные при погружении и всплытии зонда. Эти системы могут быть оснащены несколькими датчиками, что позволяет проводить комплексные измерения.

Описанный метод нашел отражение в патентах США US3404565 и Японии JPS5543960B2 (Barry, 1968; Nomoto, 1980).

Метод 5. Измерения с последовательным групповым зондированием при буксировке

Метод измерения осуществляется следующим образом (Греков, Иванов, 1985). С движущегося судна опускают кабель-трос (трос) отрицательной плавучести и ограничителем на конце. По этому тросу последовательно опускают гидрозонды, которые имеют форму крыла.

Количество гидрозондов в партии и частота их запуска определяются заранее, в зависимости от необходимой точности измерений.

Горизонтальная составляющая скорости их перемещения по кабель-тросу соизмерима со скоростью движения судна. Следовательно, гидрозонд при движении

в воде остается в одной географической точке и погружается вертикально. Данные измерений с движущихся гидрозондов передаются на борт судна по индуктивному или акустическому каналу связи и регистрируются в аналоговом или цифровом виде. Когда вся партия гидрозондов достигает конца кабель-троса, ее поднимают совместно с кабель-тросом на борт судна. Затем всю последовательность операций повторяют. Описанный метод позволяет проводить измерения профилей элементов водной среды на разрезах в широком диапазоне расстояний между ними. Минимальное расстояние между соседними профилями лимитируется только пространственными размерами гидрозондов. Не существует ограничений у этого метода на исследование больших пространственных неоднородностей. Измерительные комплексы, построенные по этому принципу, работают на полном ходу судна. Однако, при скорости судна больше 6 узлов, величина заглубления не превышает 150 м.

В ходе гидроакустических исследований во время буксировки применяется предложенный метод скольжения с вертикальным зондированием и использованием зонда, имеющего форму крыла и оснащенного пассивным гидроакустическим приемником. Независимо от скорости буксировки, система обеспечивает низкий уровень гидроакустического шума, что делает данный метод весьма эффективным.

Метод 6. Измерения с использованием обрывных гидрозондов

Метод измерения с применением одноразовых гидрозондов свободного падения предоставляет возможность осуществлять измерения в процессе движения судна, что значительно расширяет границы исследования явлений, происходящих в обширных пространственных масштабах.

Система измерения включает в себя электрический канал связи между погружаемым устройством и бортовой аппаратурой. Для передачи данных используется тонкий двухжильный медный провод, надежно защищенный от контакта с водной средой. После сбрасывания гидрозонда провод свободно сматывается с катушек, закрепленных на борту судна и на самом погружаемом устройстве. При полном сматывании происходит разрыв провода, в результате чего гидрозонд теряется. В связи с этим, он должен быть недорогим. При начальном исполнении гидрозондов трудно было получить высокую точность измерения распределенных параметров водной среды, так как в гидрозонде отсутствовал датчик глубины, и глубина отсчитывается пропорционально времени погружения прибора. Вариант, приведенный выше, относится к системам для измерения температуры; однако следует понимать, что описанная система может использоваться для измерения давления, электропроводности, скорости звука, плотности и т. д. окружающей жидкости. Таким образом, эта система может применяться для измерения различных свойств жидкости. Например, система обрывных гидрологических зондов AquaPro XCTD (https://naeco.ru/measurement_equipment/vrgp/).

Из-за вероятного запутывания и обрыва проводов, эти измерители не могут работать последовательно, что ограничивает возможность изучения малых пространственных масштабов. К числу этих измерителей относятся батитермографы разового действия T-4, T-6, T-7 фирмы Sippican (США) и др. (Reseghetti et al., 2007; Hanawa et al., 1995).

Недостатком системы является зависимость от погодных условий. С целью повышения надежности за счет устранения воздействия волнения и ветра на зонд и увеличения глубины его погружения был предложен компонент системы, обеспечивающий возможность проведения измерений в сложных погодных условиях при волнении океана более 5 баллов и скорости ветра более 15 м/с, что увеличивает глубину зондирования, сокращает холостой прогон судна (Греков и др., 1989).

Метод 7. Измерения с автоматическим управлением гидрозондом по глубине

В данной группе буксируемых измерительных устройств можно выделить комплексы, оснащенные автоматически управляемыми по глубине погружными установками. Эти комплексы представляют собой более сложную систему по сравнению с рассмотренными ранее, поскольку они включают в себя не только измерительные элементы водной среды, но и исполнительные механизмы системы управления рулями глубины.

Погружные установки таких комплексов способны функционировать в нескольких режимах: буксироваться на заданной глубине, периодически погружаться и всплывать по заданной траектории, а также следовать по заданной изотерме. Вторым режим используется для получения профилей океанографических элементов. В этом случае данные измерений, полученные при погружении и всплытии зондов на одних и тех же горизонтах, усредняются. Однако этот метод имеет ограничение на исследование малых пространственных неоднородностей. Инерционность системы, состоящей из погружной установки и кабель-троса, может привести к колебаниям в исследуемом слое с ограниченной частотой. Из-за больших динамических нагрузок работа автоматически управляемых систем происходит во многих случаях на пониженных скоростях судна. Повышение скорости буксировки возможно, однако для этого требуется применение специализированного кабеля, оснащенного обтекателями, а также использование лебедки увеличенных габаритов, что осуществимо исключительно на специализированных судах, предназначенных для подобных работ. Не вдаваясь в детальное рассмотрение функционирования отдельных систем, использующих метод зондирования с автоматическим управлением по глубине, на которые сделаны подробные ссылки (Гайский и др., 1987; Греков и др., 2020; Ullman, Hebert, 2014; Garau et al., 2011; Gregg, Hess, 1985; Греков, 1990; Martin et al., 2004; Rudnick, Klinke, 2007; Furlong A. et al., 1997; Furlong et al., 2006; <https://rbr-global.com/wp-content/uploads/2023/12/RBRglissando-Underway-Profiling-Winch-Guide-0015437revA.pdf>), была составлена таблица 1, отражающая основные технические характеристики для этого метода.

Табл. 1 – Основные технические характеристики метода измерения с автоматическим управлением гидрозондом по глубине

№ п/п	Системы с автоматическим управлением по глубине с движущегося судна	Скорость буксировки, уз	Диапазон глубин, м	Характеристика зондирования	Материал	Масса-габаритные характеристики
1	2	3	4	5	6	7
1	«Нырок-2»	6 12	0–120 0–80	Погружение и всплытие по заданной траектории	–	2140×695×500 мм; масса на воздухе 150 кг
2	«Галс»	6	0–60	то же	–	1988×1308×538 мм; масса на воздухе 96 кг
3	«Галс-2»	6 12	0–250 0–100	то же	–	2050×1260×500 мм; масса на воздухе 96 кг
4	«Кальмар»	6 12	0–90 0–200	то же	–	1980×1340×370 мм; масса на воздухе 70 кг
5	Aquashuttle Mark III	5–25	0–100	то же	–	–
6	Nu-Shuttle	5–15	0–150	то же	Каркас из нержавеющей стали, пластиковые панели	Ширина 500 мм
7	SeaSoar Mark II	12	0–500	то же	Нержавеющая сталь пластиковые панели	–
8	Klein Sub-Bottom Profiler	7	0–300	–	Нержавеющая сталь и стекловолокно	107×22×41 мм; масса на воздухе 79,4 кг; масса в воде 64,4 кг
9	Flying Fish (Летучая рыба)	0–12	0–200	Балластный подъем и погружение, направляющие крылья	–	384×226×140 мм; масса на воздухе 1300 кг; масса в воде –20 кг
10	Sea Kite (Морской змей)	–	0–500	3D-управление, направляющие крылья	–	200×100×100 мм; масса на воздухе 200 кг
11	Стандартный “Batfish” series 8500	5.4–13.5	0–200	Погружение и всплытие по заданной траектории	–	–
12	“Batfish” с широким крылом	5.4–8.64	0–400	то же	–	–

Метод 8. Измерения с циклическим изменением глубины гидрозонда

Суть метода заключается в том, что гидрозонд, являясь частью буксируемой системы, следует за судном. Периодически его погружают на заданную глубину, сматывая трос, кабель или фал. Однако для этого необходимо использовать лебедку с достаточным свободным ходом и мощностью, чтобы можно было выбрать зонд во время движения судна и иметь специальный зонд особой конструкции. Создание системы, использующей метод циклических изменений глубины, изначально было обусловлено необходимостью получения быстрых, точных и экономичных профилей с движущихся судов. В условиях растущего внимания к воздействию человеческой деятельности на окружающую среду, дополнительным стимулом для разработки таких систем является возможность их повторного использования, в отличие от одноразовых устройств. Это позволяет избежать накопления пластика и других потенциально опасных материалов на дне морей, что особенно важно в экологически уязвимых районах. Метод измерения с циклическим изменением глубины постоянно улучшается и заполняет нишу, которую не могут заполнить другие существующие буксируемые системы (Пака, Кушников, 1989).

Циклические изменения глубины погружения гидрозонда можно делать на полном ходу судна и на разрезе любой длины, значит, отсутствуют ограничения на исследование больших пространственных масштабов. Однако гидрозонд необходимо поднять наверх, чтобы начать новый цикл измерения. Поэтому остается ограничение на минимальный интервал между зондированиями. Гидрозонд имеет механическую связь с судном, это дает возможность сделать его сложным, точным, приспособленным для комплексных измерений.

Первые гидрозонды для этой системы были спроектированы, запатентованы, подвергнуты испытаниям и успешно применены на научных судах (Греков и др., 2020). Особое внимание было уделено узлу крепления между буксируемым кабелем и гидрозондом, и конструкция оказалась настолько удачной, что система могла работать в течение нескольких месяцев без необходимости переделки троса. Внешний вид запатентованного гидрозонда и узла крепления представлен на рисунке 1. Дальнейшее развитие гидрозондов для этого метода связано с появлением новых материалов и электронных компонентов. Особое внимание уделяется динамическим ошибкам измерительных каналов, которые из-за различных скоростей и направлений погружения не соответствуют заявленным статическим неопределенностям, указанным в паспорте на прибор. Исследования по улучшению динамических погрешностей измерительных каналов не прекращаются в силу постоянно изменяющихся условий эксплуатации и конструктивных особенностей гидроприборов.

В этой части можно представить обширный анализ исследований, посвященных разработке методологии обработки данных, например, для точного определения солености на основе измерений, выполненных с использованием CTD и SVP-зондов различных производителей (Греков и др., 2020; Ullman, Hebert, 2014; Garau et al., 2011; Gregg, Hess, 1985, Пака и др., 1994).

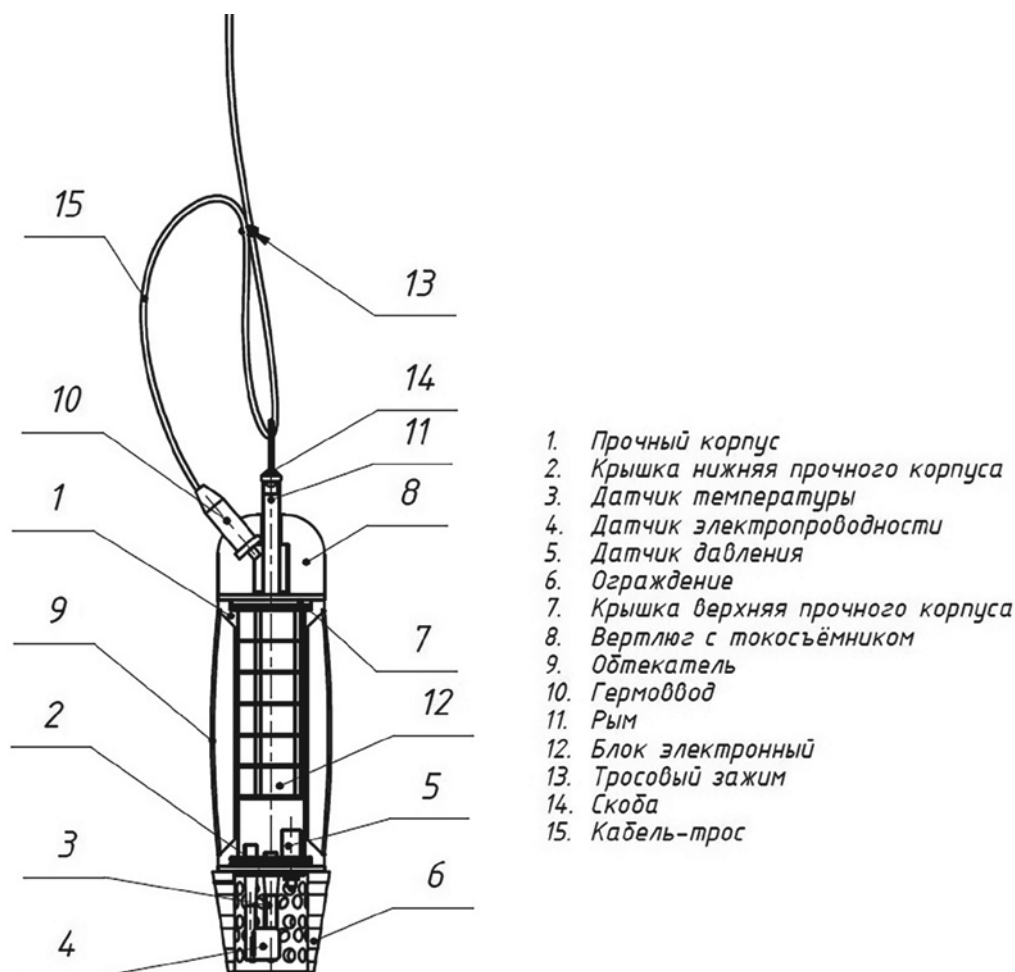


Рис. 1 – Внешний вид запатентованного гидрозонда и узла крепления

В связи с отсутствием возможности устанавливать в гидрозонды большое количество многопараметрических измерительных каналов, для решения многих задач морской гидрологии крайне важен процесс отбора проб воды с определенной глубины. Это необходимо, например, для определения концентрации первичной продукции и пигментов фитопланктона, калибровки погружных профилографов и других целей.

Поэтому существенным недостатком гидрозондов, применяемых в этом методе, является отсутствие автоматического погружного пробоотборника воды. Такой пробоотборник должен обеспечивать, при скорости набегающих потоков до 15 узлов, высокоскоростное взятие пробы на заданной глубине с одновременной автоматической записью измеряемых параметров, а также обеспечивать защиту пробы от смешивания с окружающей водой при подъеме прибора на поверхность.

Авторами этой статьи была частично решена проблема. Была разработана автоматическая кассета батометров, состоящая из 16 пробоотборников специальной конструкции. Эти пробоотборники способны эффективно отбирать морскую воду даже на высоких скоростях судна, достигающих 15 узлов.

Главная особенность этого решения заключается в том, что пробоотборник как бы «надевается» на воду, обеспечивая скорость отбора проб не более 0.2 с. Это позволяет значительно сократить исследуемые водные пространства, делая их сопоставимыми с инерционностью измерительных каналов гидрозонда (Греков, 1990).

Объем проб, взятых каждым пробоотборником, не превышает 250 мл, что в ряде случаев может оказаться недостаточным для некоторых исследований. Согласно существующей методике, для определения солености воды и содержания кислорода требуется проба объемом не менее 300 см³. Для анализа стандартного набора гидрохимических элементов, включая соленость, кислород, фосфор, кремний, азот, щелочность и концентрацию водородных ионов, необходима проба объемом не менее 1000 см³. В таком случае можно использовать одновременный автоматический отбор проб несколькими батометрами.

Прогресс в области анализа проб при малых объемах позволяет использовать буксируемые зондирующие приборы с автоматической кассетой батометров, аналогичные разработанному и представленному макету, что открывает новые перспективы для изучения широкого спектра данных. Например, успешно применяются устройства для отбора проб, объем которых составляет всего 60 мл (Martin et al., 2004).

На рисунке 2 представлена фотография макета гидрозонда, оснащенного автоматической кассетой батометров и закрепленного на кабель-тросе КГЗ-60-90 с помощью запатентованного узла крепления. Макет подвешен на блоке, установленном на корме судна. Макет прошел успешные испытания на скорости буксировки 15 узлов. Глубина погружения достигала 1000 м. Важно отметить, что некоторые компоненты прибора можно упростить, чтобы снизить его себестоимость.

Рассмотрим сравнительные графики, отражающие результаты натурных испытаний как зарубежных систем, так и гидрофизической буксируемо-зондирующей системы МГИ 4201 (Минизонд) и макета гидрозонда, оснащенного автоматической кассетой батометров.

На рисунке 3 представлены совмещенные графики функционирования системы в режиме буксировки по методу измерения с циклическим изменением глубины гидрозонда МГИ 4201 (Минизонд), Teledyne Oceanscience Rapidcast

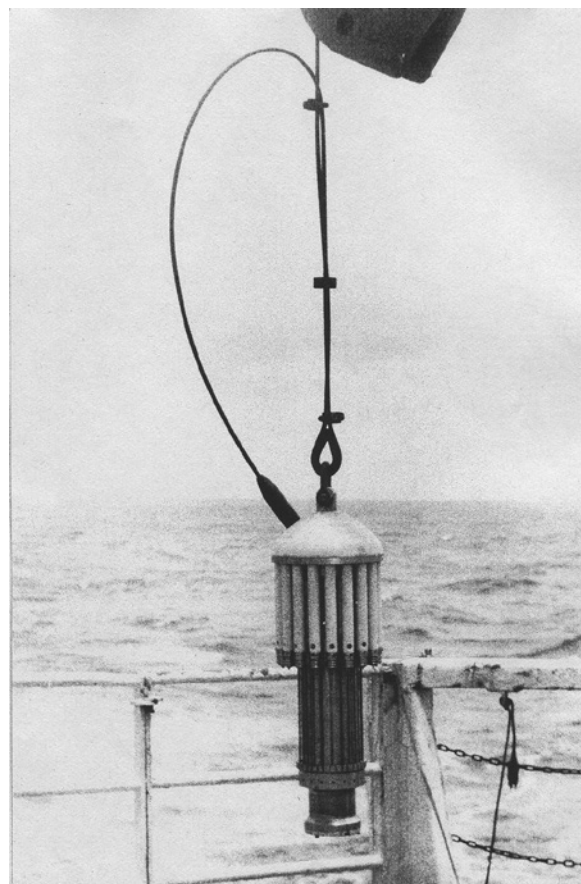


Рис. 2 – Макет гидрозонда, оснащенный автоматической кассетой батометров

(Gardiner, Slade, 2016), Brooke Ocean MVP300 (Furlong et al., 1997; Furlong et al., 2006), Scripps Institution of Oceanography Underway CTD (Rudnick, Klinke, 2007).

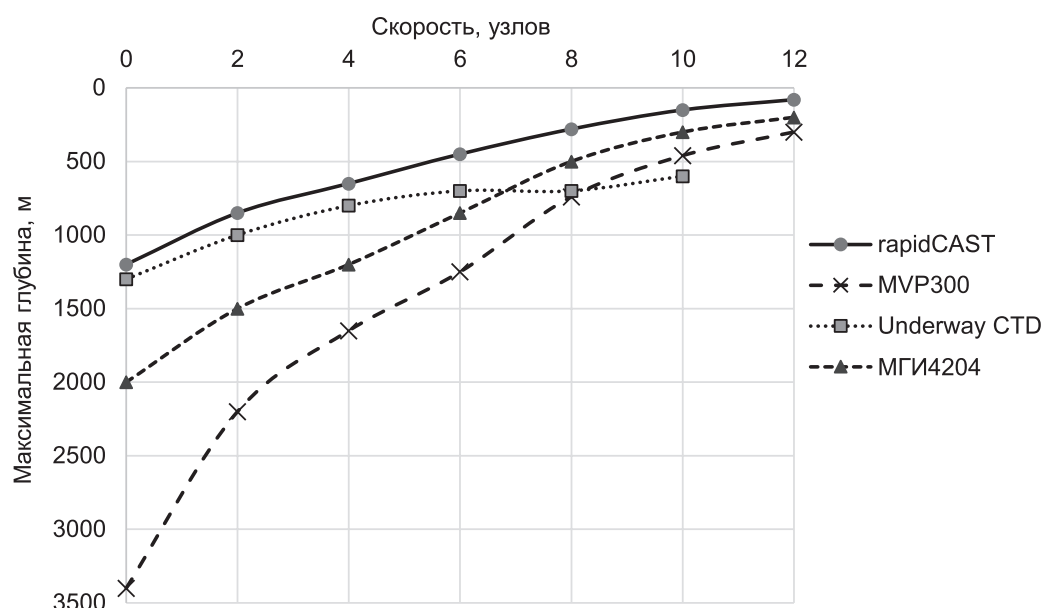


Рис. 3 – Совмещенные графики функционирования системы в режиме буксировки

Характер этих графиков у всех систем идентичен и отличается лишь незначительными отклонениями, обусловленными конструкцией гидрозондов и используемыми тросами или кабель-тросами.

В работах (Rudnick, Klinke, 2007; Dever et al., 2020) представлены результаты функционирования систем в режиме зондирования по методу измерения с циклическим изменением глубины гидрозондов. В этих исследованиях описаны результаты, которые демонстрируют, что при глубине зондирования в 400 м процесс погружения занимает около 90 с. Скорость буксировки при этом колеблется от 8 до 12 узлов. Весь процесс измерения, включая начало зондирования, погружение и подъем, занимает примерно 5 минут.

Несомненный интерес представляют экспериментальные результаты, полученные авторами статьи при разработке системы, состоящей из автоматической кассеты батометров, кабель-троса и механизма подъема. В ходе эксперимента макет буксировался и погружался на определенную глубину. В качестве механизма подъема применялась лебедка ЛК-2, работающая в режиме холостого хода.

На рисунке 4 представлен график, демонстрирующий работу системы, включающей в себя автоматическую кассету с батометрами, во время движения судна при скорости буксировки равной 15 узлам с различными длинами кабель-троса (таблица 2).

Участок А отражает время опускания гидрозонда в воду. Участок Б представляет собой процесс буксировки. Участок В показывает глубину зондирования при расторможенной лебедке при различных длинах кабельного троса. Участок Г описывает процесс торможения лебедки во времени. Участок Д отражает время и характер процесса подъема гидрозонда.

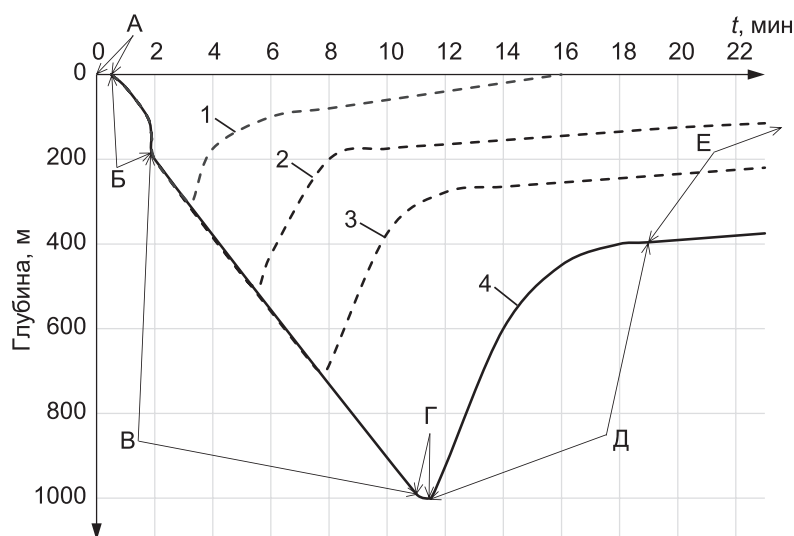


Рис. 4 – График зондирования по методу измерения с циклическим изменением глубины гидрозонта в процессе движения судна при скорости буксировки, составляющей 15 узлов

Табл. 2 – Зависимость глубины и времени зондирования от длины кабель-троса

Номер на рисунке	Глубина зондирования, м	Длина кабель-троса, м	Время зондирования, мин
1	300	950	16
2	500	1600	27
3	700	2100	38
4	1000	3100	55

Принимая во внимание, что описанная система может включать разнообразные лебедки, следует отметить, что анализ существующих, запатентованных и используемых лебедок показывает, что в этой области проводятся активные исследования, и благодаря применению передовых материалов были достигнуты значительные успехи. Некоторые результаты исследований были представлены в научных трудах (Klinke, 2009; Song et al., 2009; Dever et al., 2020; Kock et al., 2023; <https://rbr-global.com/wp-content/uploads/2023/12/RBRglissando-Underway-Profiling-Winch-Guide-0015437revA.pdf>).

Рассмотрим еще один значимый аспект исследований, посвященных методу циклических изменений глубины. Речь пойдет об анализе и разработке моделей, которые помогут нам понять необходимое время торможения и возникающие при этом усилия в системе при различных скоростях движения носителя, характеристиках троса и глубинах зондирования.

Стоит подчеркнуть, что в ходе исследования не было выявлено аналогичных моделей, специально разработанных для метода измерения, основанного на циклическом изменении глубины.

Анализ моделей, разработанных авторами этой статьи, показал, что на основе математических уравнений была проведена оценка динамических усилий в системе

трос–зонд, которая используется для контроля водной среды. Эти усилия возникают при внезапном торможении судовой лебедки. Оценка основывается на равенстве суммы работ по преодолению силы натяжения и сил гидродинамического сопротивления кинетической энергии системы в момент остановки.

Была выведена приближенная формула, которая позволяет оценить влияние различных параметров системы на динамические усилия, возникающие в тросе при внезапной остановке лебедки. Эти нагрузки могут быть весьма значительными, особенно если длина вытравленного троса мала, и даже превышать статическое натяжение троса у барабана лебедки в процессе его выборки.

При проектировании системы зондирования необходимо учитывать эти нагрузки, подбирая прочностные и упругие характеристики троса, его массу и другие параметры. Величина динамических нагрузок при одном и том же диаметре троса возрастает с увеличением его массы и скорости движения носителя, а также уменьшается с ростом длины вытравленного троса.

Характер изменения динамических нагрузок в зависимости от длины вытравленного троса зависит от его массы. Для тросов с меньшей массой снижение динамических нагрузок происходит быстрее. В работах авторов (Греков, Салтанов, 2001; Салтанов и др., 2002; Греков и др., 2004) представлены разработанные модели, уравнения и графики, которые могут быть полезны для практических расчетов систем, основанных на методе измерения с циклическим изменением глубины. К этой группе измерителей относится гидрофизический буксируемо-зондирующий комплекс МГИ 4201 (Минизонд) (Смирнов, 1984).

В процессе развития метода коллектив (Куклев и др., 2021) провел интересные исследования. Авторы синхронно измеряли параметры течения и структуру водных масс с движущегося судна разработанным комплексом. Одновременно фиксировались ключевые характеристики течения: скорость, направление и уровень турбулентности. Также детально анализировалась гидрологическая структура водных масс, включая температурные перепады, соленость и плотность.

В заключение в таблице 3 представим результаты проведенного в статье анализа методов и систем измерения пространственно-временных характеристик океанов и морей на ходу судна. Здесь цифрами обозначены методы измерения в том порядке, как они перечислены: «1» – наличие признака, «0» – его отсутствие.

Порядковые номера и названия описанных в статье методов и систем измерения пространственно-временных характеристик океанов и морей на ходу судна:

Метод 1. Измерения с интегральными измерителями и восстановлением профиля.

Метод 2. Измерения с гидрозондами свободного падения и всплытия многократного действия.

Метод 3. Измерения с применением буксировки гирлянды гидрозондов.

Метод 4. Измерения гидрозондом, оснащенного подвижным крылом.

Метод 5. Измерения с последовательным групповым зондированием при буксировке, погружается вертикально.

Метод 6. Измерения с использованием обрывных гидрозондов.

Метод 7. Измерения с автоматическим управлением гидрозондом по глубине.

Метод 8. Измерения с циклическим изменением глубины гидрозонда.

Табл. 3 – Результаты анализа методов и систем измерения пространственно-временных характеристик океанов и морей на ходу судна

№ п/п	Назначение и характеристика метода	Методы и системы измерения пространственно-временных характеристик океанов и морей на ходу судна							
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
1	Исследование микроструктурных и тонкоструктурных пространственно-временных характеристик воды: по вертикали от 0.1м, по горизонтали от 1 см	0	1	0	0	1	0	0	1
2	Исследование мезомасштабных пространственно-временных характеристик морских и океанических акваторий: по вертикали от 1 м, по горизонтали от 100 м	0	1	1	1	1	1	1	1
3	Работа на полном ходу судна (16 узлов до глубины 1000 м)	1	1	0	0	1	1	1	1
4	Вертикальное погружение	0	1	0	0	1	-1	-0	1
5	Сохранность погружаемого устройства (гидрозонда)	1	1	1	1	1	0	1	1
6	Комплексность измерений	0	1	1	1	1	1	0	1
7	Попутные измерения	1	0	0	0	0	1	0	1
8	Комплексность измерений с батометрами	0	1	0	0	1	0	0	1
9	Погружение и всплытие по заданной траектории	0	0	0	0	0	0	1	0
10	Сложность в реализации	0	1	1	1	1	0	1	0
11	Исследование крупномасштабных пространственно-временных характеристик океанов и морей: по вертикали от 100 м, по горизонтали от 100 км	1	0	0	1	1	1	1	1

Практические рекомендации по результатам таблицы 3: под задачу микроструктурных исследований (вертикальное разрешение $\leq 0,1$ м, горизонтальное ≤ 1 см) целесообразно ориентироваться на метод 8 (циклическое изменение глубины с частотой до нескольких раз в минуту), дополнив систему высокочастотными датчиками и компактными пробоотборниками. Мезомасштабные исследования (вертикально 1–100 м, горизонтально ≥ 100 м) эффективно проводить сочетанием методов 2 и 3 (автономные гидрозонды свободного падения и буксировка гирлянды), что обеспечивает баланс между пространственным покрытием и скоростью зондирования. При необходимости попутных измерений на полном ходу судна (до 16 узлов) оптимальны методы 5 и 8, так как они допускают вертикальное погружение с сохранением точности и минимальными логистическими

затратами. Для комплексных мультипараметрических замеров (СТД + гидрохимия + биология) рекомендуется использовать метод 8 с автоматической кассетой батометров, что сокращает время полевой кампании и снижает объем смешанных проб. При выборе системы для крупномасштабных экспедиций (вертикально ≥ 100 м, горизонтально ≥ 100 км) целесообразно отдавать предпочтение модульным платформам с возможностью быстрой замены сенсоров и лебедкам повышенной мощности (комбинация методов 7 и 8). Для бюджетных проектов при ограниченных ресурсах рекомендуется использовать метод 6 (одноразовые обрывные гидрозонды) в сочетании с автопробоотборником низкого объема, что минимизирует капитальные и операционные затраты.

Выводы

С научной точки зрения, ключевым достижением применения буксируемо-зондирующих систем по представленным методам является формирование новой парадигмы экспедиционных исследований. Принципиальное отличие предложенного подхода состоит в интеграции модульных зондов с автоматическим управлением глубиной, кассетой пробоотборников и адаптивным маршрутом буксировки. Такая синергия позволяет перейти от точечных разрозненных замеров к динамически управляемому комплексному мониторингу морской среды в реальном времени, что и задает новую парадигму современного океанографического экспедиционного зондирования. По мере развития таких систем и улучшения методов исследования происходит качественный скачок в понимании и изучении морских акваторий. При осуществлении экспресс-съемки обширных акваторий весьма целесообразно применять представленные буксируемые зондирующие системы, оснащенные современными технологиями и инструментами, позволяющими измерять характеристики морской воды непосредственно на *in situ*. В ряде случаев данные, собранные такими системами, могут служить основой для выбора участков, где требуется более детальное исследование с учетом широкого набора параметров. Для исследования экосистем предлагается осуществить сбор значительного массива проб для последующего анализа всех видов планктона, а также биохимических параметров органического вещества, уровня загрязнений и других характеристик. Для этой цели предлагается использовать буксируемую систему, оснащенную усовершенствованной кассетой батометров, разработанной специально для этой задачи.

Таким образом, использование современных методов и технологий в области съемки предоставляет исследователям не только широкие возможности для разработки плана эксперимента, но и позволяет контролировать его в процессе изучения, обеспечивая глубокое понимание сути исследуемых явлений. Грамотное применение рассмотренных методов, систем и технологий в океанографических исследованиях может привести к существенной экономической выгоде за счет оптимизации временных и других показателей.

Благодарности. Работа выполнена по госбюджетной теме «Совершенствование технических средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод» (№ госрегистрации 124012700512-1).

Список литературы

1. Гайский В. А., Артемов Ю. Г., Блинков В. А., Ермаков А. Г., Жаров Н. А., Кирсанов И. С., Николаев В. М. Автоматизированные системы с буксируемыми приборами в океанологических исследованиях / Отв. ред. В. А. Гайский; АН УССР, Ин-т биологии южных морей им. А. О. Ковалевского. Киев: Наукова думка, 1987. 176 с.
2. Греков Н. А. Применение теории распознавания образов в обработке данных измерений комплекса «Шлейф». В кн.: Методы и аппаратура для океанологических исследований: Сборник статей. Севастополь: МГИ АН УССР, 1982. С. 138–144.
3. Греков Н. А. Буксируемые комплексы с распределенными датчиками температуры для исследования деятельного слоя океана: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.12. Севастополь: МГИ АН УССР, 1985. 161 с.
4. Греков Н. А., Иванов А. Ф. Способ измерения вертикальных распределений элементов морской воды на океанологических разрезах: А.с. SU 1191735 A1 (СССР) // Б. И. 1985. № 42. С. 158.
5. Греков Н. А., Иванов А. Ф., Соловьева Р. Н. Устройство сбрасывания свободнопадающего гидрозонта разового действия: патент SU 1525646 A1 (СССР). Заявлено 12.12.1986. Опубл. 30.11.1989. Бюл. № 44.
6. Греков Н. А. Устройство для отбора проб жидкости: А.с. 1602165. 22.06.1990.
7. Греков Н. А., Салтанов Н. В. Измерение вертикальных распределений параметров водной среды с движущегося судна. В кн.: Системы контроля окружающей среды: Сборник научных трудов. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2001. С. 71–80.
8. Греков Н. А., Салтанов Н. В., Авраменко П. Г. Анализ времени торможения и усилий буксируемых зондирующих систем, контролирующих водную среду. В кн.: Системы контроля окружающей среды: Сборник научных трудов. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. С. 73–76.
9. Греков Н. А., Греков Н. А., Сычев Е. Н. Среднечастотные акустические методы и средства для исследования водной среды. Севастополь: ИПТС, 2020. 126 с. ISBN 978-5-6044196-6-3.
10. Иванов А. Ф., Парамонов А. Н., Греков Н. А. Буксируемый комплекс для исследования изменчивости интегральной температуры верхнего слоя океана // Океанология. 1980. Т. 20. № 5. С. 937–942.
11. Иванов А. Ф., Парамонов А. Н., Греков Н. А. Восстановление профилей температуры морской воды по данным измерений распределенными датчиками температуры // Морские гидрофизические исследования. Севастополь: МГИ АН УССР, 1980. № 2. С. 157–163.
12. Колесников А. Г., Пантелеев Н. А., Писарев В. Д., Вакулов П. В. Глубоководный автономный турбулиметр – прибор для регистрации турбулентных флуктуаций скорости и температуры в океане // Океанология. 1963. Т. 3. № 5. С. 911.
13. Куклев С. Б., Зацепин А. Г., Пака В. Т., Баранов В. И., Куклева О. Н., Подымов О. И., Подуфалов А. П., Корж А. О., Кондрашов А. А., Соловьев Д. М. Опыт одновременных измерений параметров течения и гидрологической структуры вод с борта движущегося судна // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 147–155.

14. *Лямин Э. А., Науменко М. Ф., Пака В. Т., Чиграков К. И., Шматко М. А.* Опыт применения буксируемой гирлянды термисторов для исследования термической структуры моря // *Океанология*. 1965. Т. 5. № 3. С. 553–557.
15. *Пака В. Т., Корчашкин Н. Н., Нарожный В. В., Шмагин А. Б.* Автоматизированная система термопрофилирования верхнего слоя океана // *Океанология*. 1984. Т. 24. № 1. С. 170–174.
16. *Пака В. Т., Кушников В. В.* Об использовании термохалозондов в режиме буксировки // *Океанология*. 1989. Т. 29. № 1. С. 160–163.
17. *Пака В. Т., Бамбизов Г. А., Голенко Н. Н., Зарубин Е. П., Маслов В. А., Подуфалов А. П.* Сканирующий буксируемый мультизондовый комплекс термохалотрал // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 1. С. 133–138.
18. *Пака В. Т., Баранов В. И., Кондрашов А. А., Корж А. О., Подуфалов А. П.* Привязной свободно падающий зонд: патент на полезную модель RU121599U1 (Россия). Заявлено 24.05.2012. Оpubл. 27.10.2012. Бюл. № 30.
19. *Салтанов Н. В., Авраменко П. Г., Греков Н. А.* Оценка динамических усилий в системе трос-зонд буксируемого комплекса контроля водной среды. В кн.: Системы контроля окружающей среды: Сборник научных трудов. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2002. С. 90–93.
20. *Смирнов Г. В.* Проектирование модульных систем для автоматизации океанографических экспериментальных исследований: Дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.12. Севастополь, 1984. 424 с.
21. *Черниченко А. С.* Всплывающий зонд для измерения гидрофизических параметров воды: патент SU959010A1 (СССР). Заявлено 14.11.1980. Оpubл. 15.09.1982. Бюл. № 34.
22. *Barry D. T., Branham D. W.* Towed oceanographic sensor system: Patent US3404565, 1968.
23. *Dever M., Freilich M., Farrar T., Hodges B., Lanagan T., Baron A., Mahadevan A.* EcoCTD for profiling oceanic physical–biological properties from an underway ship // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2020. Vol. 37. No. 5. P. 825–840. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0145.1>.
24. *Furlong A., Beanlands B., Chin-Yee M.* Moving vessel profiler (MVP) real time near vertical data profiles at 12 knots // *Oceans' 97. MTS/IEEE Conference Proceedings. IEEE*, 1997. Vol. 1. P. 229–234. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1997.634367>.
25. *Furlong A., Osier J., Christian H., Cunningham D., Pecknold S.* The Moving Vessel Profiler (MVP) – a Rapid Environmental Assessment Tool for the collection of water column profiles and sediment classification // *Defense Research and Development Canada*. 2006. Vol. 13.
26. *Garau B., Ruiz S., Zhang W. G., Pascual A., Heslop E., Kerfoot J., Tintoré J.* Thermal lag correction on Slocum CTD glider data // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2011. Vol. 28. No. 9. P. 1065–1071. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-10-05030.1>.
27. *Gardiner J., Slade I.* Rapid Sound Speed Profiling in Plymouth Sound (Part 1) // *Soundings*. 2016. No. 67. P. 23.
28. *Gregg M. C., Hess W. C.* Dynamic response calibration of Sea-Bird temperature and conductivity probes // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 1985. Vol. 2. No. 3. P. 304–313. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1985\)002<0304>](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1985)002<0304>).
29. *Hanawa K., Rual P., Bailey R., Sy A., Szabados M.* A new depth-time equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBT) // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1995. Vol. 42. No. 8. P. 1423–1451. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)97154-Z](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)97154-Z).
30. *Klinke J.* UCTD – A new tool for underway soundspeed profiling // *OCEANS 2009-EUROPE. IEEE*. 2009. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2009.5278112>.

31. *Kock T., Baschek B., Wobbe F., Heineke M., Riethmueller R., Deschner S. C., Seidel G., Calil P.* An advanced towed CTD chain for physical-biological high resolution in situ upper ocean measurements // *Frontiers in Marine Science*. 2023. Vol. 10. P. 1183061. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1183061>.
32. *Martin J. B., Thomas R. G., Hartl K. M.* An inexpensive, automatic, submersible water sampler // *Limnology and Oceanography: Methods*. 2004. Vol. 2. No. 12. P. 398–405. <https://doi.org/10.4319/lom.2004.2.398>.
33. *Nomoto Masao.* Automatic lifting gear of underwater towed body: Patent JPS5543960B2. Publication of 10.11.1980.
34. *Paka V. T., Nabatov V. N., Lozovatsky I. D., Dillon T. M.* Oceanic microstructure measurements by BAKLAN and GRIF // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1999. Vol. 16. No. 11. Part 1. P. 1519–1532.
35. *Reseghetti F., Borghini M., Manzella G. M. R.* Factors affecting the quality of XBT data—results of analyses on profiles from the Western Mediterranean Sea // *Ocean Science*. 2007. Vol. 3. No. 1. P. 59–75. <https://hal.science/hal-00298314v1>.
36. *Rudnick D. L., Klinke J.* The Underway Conductivity-Temperature-Depth Instrument // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2007. Vol. 24. No. 11. P. 1910–1923. <https://doi.org/10.1175/JTECH2100.1>.
37. *Song X., Li H., Lin X., Chen X., Guo X., Tian J.* Sea experiments of the Underway Conductivity-Temperature-Depth prototype made in China // *Journal of Ocean University of China*. 2009. Vol. 8. P. 409–415. <https://doi.org/10.1007/s11802-009-0409-x>.
38. *Ullman D. S., Hebert D.* Processing of underway CTD data // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2014. Vol. 31. No. 4. P. 984–998. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00200.1>.
39. <https://rocklandscientific.com/wp-content/uploads/2025/04/VMP-6000.pdf> (дата обращения: 04.03.2025).
40. https://naeco.ru/measurement_equipment/vrgrp/ (дата обращения: 20.02.2025).
41. <https://rbr-global.com/wp-content/uploads/2023/12/RBRglissando-Underway-Profiling-Winch-Guide-0015437revA.pdf> (дата обращения: 05.03.2025).

Статья поступила в редакцию 15.04.2025, одобрена к печати 29.05.2025.

Для цитирования: Греков А. Н., Греков Н. А. Современное состояние и перспективы развития буксируемых океанологических зондирующих систем // *Океанологические исследования*. 2025. Т. 53. № 3. С. 167–189. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(3\).10](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).10).

CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF TOWED OCEANOLOGICAL PROBING SYSTEMS

A. N. Grekov, N. A. Grekov

*Institute of Natural and Technical Systems,
14, Gogol St., Sevastopol, 299011, Russia,
e-mail: i@angrekov.ru*

The article is devoted to the analysis of modern towed probig systems used to measure seawater characteristics in situ during vessel motion. Key methods are considered, including integral meters, hydrosonde strings, systems with automatic depth control and cyclic sounding. Particular attention is paid to the advantages of towed systems over autonomous devices (drifters, gliders) and stationary networks: high mobility, operational data transmission, flexible adaptation of the trajectory and depth of measurements. Based on experimental data and the author's developments, a comparative analysis of 8 methods is carried out, their technical characteristics, limitations and areas of application are highlighted. For example, the method of cyclic depth change (up to 1000 m at a speed of 15 knots) provides high resolution in the study of microstructural processes, and hybrid systems (for example, MGI 4201) combine CTD, hydrochemistry and turbulence measurements, reducing the time of expeditions. The results are presented in tabular form, including an assessment of the methods by the criteria: spatiotemporal resolution, towing speed, and measurement complexity. Practical recommendations emphasize the feasibility of combining methods to solve specific problems (microstructural, mesoscale, and large-scale studies). The key conclusion is the formation of a new paradigm for expeditionary research based on synchronous multiparametric monitoring in real time. This allows moving from local measurements to dynamic control of the probing process, which significantly increases the efficiency of studying ocean processes and optimizes resource costs.

Keywords: methods, towed systems, models, contact measurements, immersion, analysis

Acknowledgement: The study was supported by state assignment of Institute of Natural and Technical Systems (Project reg. No. 124012700512-1).

References

1. Barry, D. T. and D. W. Branham, 1968: *Towed oceanographic sensor system*: Patent US3404565.
2. Chernichenko, A. S., 1982: *Vsplyvayushchiy zond dlya izmereniya gidrofizicheskikh parametrov vody (Pop-up probe for measuring hydrophysical parameters of water)*: Patent SU959010A1 (SSSR), Bulletin. No. 34.
3. Dever, M., M. Freilich, T. Farrar, B. Hodges, T. Lanagan, A. Baron, and A. Mahadevan, 2020: EcoCTD for profiling oceanic physical–biological properties from an underway ship. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **37** (5), 825–840, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0145.1>.
4. Furlong, A., B. Beanlands, and M. Chin-Yee, 1997: Moving vessel profiler (MVP) real time near vertical data profiles at 12 knots. *Oceans' 97. MTS/IEEE Conference Proceedings. IEEE*, **1**, 229–234, <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1997.634367>.

5. Furlong, A., J. Osier, H. Christian, D. Cunningham, and S. Pecknold, 2006: The Moving Vessel Profiler (MVP) – a Rapid Environmental Assessment Tool for the collection of water column profiles and sediment classification. *Defense Research and Development Canada*, **13**.
6. Gaisky, V. A., Yu. G. Artemov, V. A. Blinkov, A. G. Ermakov, N. A. Zharov, I. S. Kirsanov, and V. M. Nikolaev, 1987: *Avtomatizirovannye sistemy s buksiruyemyimi priborami v okeanologicheskikh issledovaniyakh (Automated systems with towed instruments in oceanographic research)*. Kyiv, Naukova dumka, 176 p.
7. Garau, B., S. Ruiz, W. G. Zhang, A. Pascual, E. Heslop, J. Kerfoot, and J. Tintore, 2011: Thermal lag correction on Slocum CTD glider data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **28** (9), 1065–1071, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-10-05030.1>.
8. Gardiner, J. and I. Slade, 2016: Rapid Sound Speed Profiling in Plymouth Sound (Part 1), *Soundings*, 67, 23 p.
9. Gregg, M. C. and W. C. Hess, 1985: Dynamic response calibration of Sea-Bird temperature and conductivity probes. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **2** (30), 304–313, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1985\)002,0304](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1985)002,0304).
10. Grekov, N. A., 1982: Primeneniye teorii raspoznavaniya obrazov v obrabotke dannykh izmereniy kompleksa “Shleyf” (Application of pattern recognition theory in processing measurement data of the Shleif complex). *Metody i apparatura dlya okeanologicheskikh issledovaniy*, Sevastopol, MGI Akademii Nauk USSR, 138–144.
11. Grekov, N. A., 1985: *Buksiruyemyye komplekсы s raspredelennymi datchikami temperatury dlya issledovaniya deyatel’nogo sloya okeana*: dis. ... kand. tekhn. nauk: 01.04.12 (Towed complexes with distributed temperature sensors for studying the active layer of the ocean: Cand. tech. sci. thesis), Sevastopol, MGI Akademii Nauk USSR, 161 p.
12. Grekov, N. A. and A. F. Ivanov, 1985: *Sposob izmereniya vertikal’nykh raspredeleniy elementov morskoy vody na okeanologicheskikh razrezakh (Method for measuring vertical distributions of seawater elements in oceanographic sections)*. Avtorskoye svidetel’sтво SU1191735A1 (SSSR). *B. I.*, **42**, 158 p.
13. Grekov, N. A., A. F. Ivanov, and R. N. Solov’yeva, 1989: *Ustroystvo sbrasyvaniya svobodnopadayushchego gidrozonda razovogo deystviya (Single-action free-fall hydrosonde release device)*. Patent SU1525646A1 (SSSR), Bulletin No. 44.
14. Grekov, N. A., 1990: *Ustroystvo dlya otbora prob zhidkosti (Liquid sampling device)*. Avtorskoye svidetel’sтво 1602165.
15. Grekov, N. A. and N. V. Saltanov, 2001: Izmereniye vertikal’nykh raspredeleniy parametrov vodnoy sredy s dvizhushchegosya sudna (Measuring vertical distributions of aquatic environment parameters from a moving vessel). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, Sevastopol, MGI Akademii Nauk USSR, 71–80.
16. Grekov, N. A., N. V. Saltanov, and P. G. Avramenko, 2004: Analiz vremeni tormozheniya i usiliy buksiruyemykh zondiruyushchikh sistem, kontroliruyushchikh vodnuyu sredu (Analysis of braking times and forces of towed probing systems monitoring the aquatic environment). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, Sevastopol, MGI Akademii Nauk USSR, 73–76.
17. Grekov, A. N., N. A. Grekov, and E. N. Sychov, 2020: *Srednechastotnyye akusticheskiye metody i sredstva dlya issledovaniya vodnoy sredy (Mid-frequency acoustic methods and instruments for the study of the aquatic environment)*. Sevastopol, IPTS, 126 p., ISBN 978-5-6044196-6-3.
18. Hanawa, K., P. Rual, R. Bailey, A. Sy, and M. Szabados, 1995: A new depth-time equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBT). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **42** (8), 1423–1451, [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)97154-Z](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)97154-Z).

19. Ivanov, A. F., A. N. Paramonov, and N. A. Grekov, 1980: Buksiruyemyy kompleks dlya issledovaniya izmenchivosti integral'noy temperatury verkhnego sloya okeana (Towed complex for studying the variability of the integral temperature of the upper layer of the ocean). *Oceanology*, **20** (5), 937–942.
20. Ivanov, A. F., A. N. Paramonov, and N. A. Grekov, 1980: Vosstanovleniye profiley temperatury morskoy vody po dannym izmereniy raspredelennymi datchikami temperatury (Reconstruction of seawater temperature profiles from distributed temperature sensor measurements). *Morskiye gidrofizicheskiye issledovaniya*, Sevastopol, MGI Akademii Nauk USSR, **2**, 157–163.
21. Klinke, J., 2009: UCTD – A new tool for underway soundspeed profiling. *OCEANS 2009-EUROPE. IEEE*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2009.5278112>.
22. Kock, T., B. Baschek, F. Wobbe, M. Heineke, R. Riethmueller, S. C. Deschner, G. Seidel, and P. Calil, 2023: An advanced towed CTD chain for physical-biological high resolution in situ upper ocean measurements. *Frontiers in Marine Science*, **10**, 1183061, <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1183061>.
23. Kolesnikov, A. G., N. A. Panteleyev, V. D. Pisarev, and P. V. Vakulov, 1963: Glubokovodnyy avtonomnyy turbulimetr – pribor dlya registratsii turbulentnykh fluktuatsiy skorosti i temperatury v okeane (Deep-sea autonomous turbulimeter – a device for recording turbulent fluctuations of speed and temperature in the ocean). *Oceanology*, **3** (5), 911.
24. Kuklev, S. B., A. G. Zatsepin, and V. T. Paka et al. 2021: Experience of Simultaneous Measurements of Parameters of Currents and Hydrological Structure of Water from a Moving Vessel. *Oceanology*, **61**, 132–138.
25. Lyamin, E. A., M. F. Naumenko, V. T. Paka, K. I. Chigrakov, and M. A. Shmatko, 1965: Opyt primeneniya buksiruyemoy girlyandy termistorov dlya issledovaniya termicheskoy struktury moray (Experience of using a towed string of thermistors to study the thermal structure of the sea). *Oceanology*, **5** (3), 553–557.
26. Martin, J. B., R. G. Thomas, and K. M. Hartl, 2004: An inexpensive, automatic, submersible water sampler. *Limnology and Oceanography: Methods*, **2** (12), 398–405, <https://doi.org/10.4319/lom.2004.2.398>.
27. Nomoto, Masao, 1980: *Automatic lifting gear of underwater towed body*: Patent JPS5543960B2.
28. Paka, V. T., N. N. Korchashkin, V. V. Narozhnyy, and A. B. Shmagin, 1984: Avtomatizirovannaya sistema termoprofilirovaniya verkhnego sloya okeana (Automated system for temperature profiling of the upper ocean layer). *Oceanology*, **24** (1), 170–174.
29. Paka, V. T., and V. V. Kushnikov, 1989: Ob ispol'zovanii termokhalozondov v rezhime buksirovki (On the use of thermohalosondes in towing mode). *Oceanology*, **29** (1), 160–163.
30. Paka V. T., G. A. Bambizov, H. H. Golenko, Ye. P. Zarubin, V. A. Maslov, and A. P. Podufalov, 1994: Skaniruyushchiy buksiruyemyy mul'tizondovyy kompleks termokhalotral (Scanning towed multiprobe complex thermohalotral). *Oceanology*, **34** (1), 133–138.
31. Paka, V. T., V. N. Nabatov, I. D. Lozovatsky, and T. M. Dillon, 1999: Oceanic microstructure measurements by BAKLAN and GRIF. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **16** (11), 1519–1532.
32. Paka, V. T., V. I. Baranov, A. A. Kondrashov, A. O. Korzh, and A. P. Podufalov, 2012: *Privyaznoy svobodno padayushchiy zond (Tethered Free-Fall Probe)*: Patent RU121599U1 (Russia). Bulletin No. 30.
33. Reseghetti, F., M. Borghini, and G. M. R. Manzella, 2007: Factors affecting the quality of XBT data—results of analyses on profiles from the Western Mediterranean Sea. *Ocean Science*, **3** (1), 59–75, <https://hal.science/hal-00298314v1>.
34. Rudnick, D. L. and J. Klinke, 2007: The Underway Conductivity-Temperature-Depth

- Instrument. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **24** (11), 1910–1923, <https://doi.org/10.1175/JTECH2100.1>.
35. Saltanov, N. V., P. G. Avramenko, and N. A. Grekov, 2002: Otsenka dinamicheskikh usiliy v sisteme tros-zond buksiruyemogo kompleksa kontrolya vodnoy sredy (Evaluation of dynamic forces in the cable-probe system of a towed water environment monitoring complex). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, Sevastopol, MGI Akademii Nauk USSR, 90–93.
 36. Smirnov, G. V., 1984: *Proyektirovaniye modul'nykh sistem dlya avtomatizatsii okeanograficheskikh eksperimental'nykh issledovaniy*: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 01.04.12 (Design of modular systems for automation of oceanographic experimental research: Dr. tech. sci. thesis), Sevastopol, 424 p.
 37. Song, X., H. Li, X. Lin, X. Chen, X. Guo, and J. Tian, 2009: Sea experiments of the Underway Conductivity-Temperature-Depth prototype made in China. *Journal of Ocean University of China*, **8**, 409–415, <https://doi.org/10.1007/s11802-009-0409-x>.
 38. Ullman, D. S. and D. Hebert, 2014: Processing of underway CTD data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **31** (4), 984–998, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00200.1>.
 39. <https://rocklandscientific.com/wp-content/uploads/2025/04/VMP-6000.pdf> (last accessed in 04.03.2025).
 40. https://naeco.ru/measurement_equipment/vrgp/ (last accessed in 20.02.2025).
 41. <https://rbr-global.com/wp-content/uploads/2023/12/RBRglissando-Underway-Profiling-Winch-Guide-0015437revA.pdf> (last accessed in 05.03.2025).

Submitted 15.04.2025, accepted 29.05.2025.

For citation: Grekov A. N. and N. A. Grekov, 2025: Current state and development prospects of towed oceanological probing systems. *Journal of Oceanological Research*, **53** (3), 167–189, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(3\).10](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).10).